

П.Е. Григоровский, д.т.н., проф, с.н.с., ORCID: 0000-0003-0527-5890

зав. кафедрой автоматизации технологических процессов КНУСА, г. Киев;

В.Ю. Луценко, к.т.н., доцент кафедры автоматизации технологических процессов;

О.В. Бондарчук, к.т.н., доцент кафедры автоматизации технологических процессов ;

Л.Г. Соболевская ассистент кафедры автоматизации технологических процессов;

М.В. Волчков ассистент кафедры автоматизации технологических процессов;

А.А. Вольгерс ассистент кафедры автоматизации технологических процессов;

Н.И. Самойленко ассистент кафедры автоматизации технологических процессов

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МЕТОДАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. Развитие альтернативной энергетики и применения ее достижений при проектировании и внедрении в составе гражданских объектов на этапе их строительства и эксплуатации требует комплексного подхода к определению характеристик качества преобразователей одного вида энергии в другой. В настоящее время активно развивается направление, связанное использованием элементов Пельтье в составе тепловых насосов, входящих в систему кондиционирования зданий. Высокой эффективностью отличается термоэлектрический обогрев помещений, поскольку кроме выделения джоулева тепла имеет место дополнительное выделение теплоты Пельтье. Одно из перспективных направлений этой отрасли связано с применением термоэлектрических устройств, самыми известными из которых являются термоэлектротермогенераторы и холодильные элементы Пельтье. Получение новых термоэлектрических материалов и совершенствование технологий обеспечили повышение эффективности термоэлектрического преобразования энергии, что сделало оправданным их применение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на протяжении их жизненного цикла. Для повышения эффективности термоэлектрических преобразователей предложен новый способ и экспериментальная установка определения комплекса характеристик термоэлектрических модулей с использованием тестовой действия, которое формируется с использованием теплоты Пельтье. Значение сопротивления модуля, термоэлектрической добротности и постоянной времени определяется в ходе анализа переходного процесса, который возникает в результате периодического изменения полярности пропускаемых через модуль импульсов тока. Разработанный алгоритм обеспечивает уменьшение результирующей погрешности за счет уменьшения влияния на результаты измерения тепла Джоуля и усреднения результатов.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, термоэлектричество, термоэлектрические параметры, метод Хармана, переходный процесс, измерения, погрешности.

В последнее время особую актуальность приобретают вопросы альтернативной энергетики. Получение новых термоэлектрических материалов и совершенствование технологий обеспечили повышение эффективности термоэлектрического преобразования энергии, что сделало оправданным их применение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на протяжении их жизненного цикла. В настоящее время активно развивается направление, связанное использованием элементов Пельтье в составе тепловых насосов, входящих в состав систем кондиционирования зданий. Высокой эффективностью отличается термоэлектрический обогрев помещений, поскольку кроме выделения джоулева тепла имеет место дополнительное выделение теплоты Пельтье.[2]. Одно из перспективных направлений этой отрасли связано с применением термоэлектрических устройств, самыми известными из которых являются термоэлектротермогенераторы и холодильные элементы Пельтье. [1] Эти устройства реализуют прямое и обратное преобразование теп-

ловой и электрической энергии, при этом не содержат в своем составе движущихся частей или ядовитых хладагентов, что является их безусловным преимуществом. Кроме того, хорошие результаты получены при использовании этих устройств для утилизации низкотемпературного тепла (тепловых загрязнений).

Область применения термоэлектротермогенераторов и холодильников в большинстве случаев ограничивалась автономными источниками питания и элементами термостабилизации устройств микроэлектроники.

Основным критерием оценки качества термоэлектрических элементов является параметр эффективности, впервые введенный Иоффе, [1] и названный в последствии термоэлектрической добротностью – $z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}$ (где α – коэффициент Зеебека, σ – электропроводности, а λ – теплопроводности).

Простой и эффективный способ измерения z был предложен Харманом, который показал,

что добротность можно находить непосредственно из соотношения электрических сопротивлений термозлемента, определенных в адиабатических и изотермических условиях. [2]

Дальнейшее совершенствование этого метода показало необходимость введения ряда поправок, связанных с влиянием на результаты измерения выделения в объеме полупроводника тепла Джоуля, наличием тепловых потерь и электрического контактного сопротивления. В работе [3] предложена модификация метода Хармана, суть которой заключается в проведении измерений на переменном токе представленном последовательностью прямоугольных импульсов. Недостатком такого подхода является влияние на результаты частоты переменного тока. При измерении сопротивления модуля на низких частотах сказывается влияние эффекта Пельтье, а на высоких частотах появляется составляющая ошибки связанная с влиянием паразитных индуктивностей. На практике часто используют биполярный вариант этого метода, при котором измерения производят на прямом и обратном постоянном токе, что позволяет уменьшить дисбаланс нулевого смещения и влияние термо-ЭДС.

В работе [4] представлен тестовый метод определения характеристик термоэлектрического модуля, в основе которого лежит анализ переходного процесса. Через модуль пропускается импульс тока и регистрируется напряжение на его выходе. Предложенный подход требует применения быстродействующего АЦП с высокой разрешающей способностью, что обеспечит дальнейшую реконструкцию сигнала. Высокие требования к измерительной части имеют ограничительное влияние на реализацию этого подхода.

В настоящей работе предложена новая методика измерения параметров термоэлектрического модуля, которая по своей сути также относится к тестовым методам, однако при этом характеризуется относительной простотой и не требует применения высокоточной аппаратуры.

Измерительная установка

Схема измерительной установки представлена на рис.1

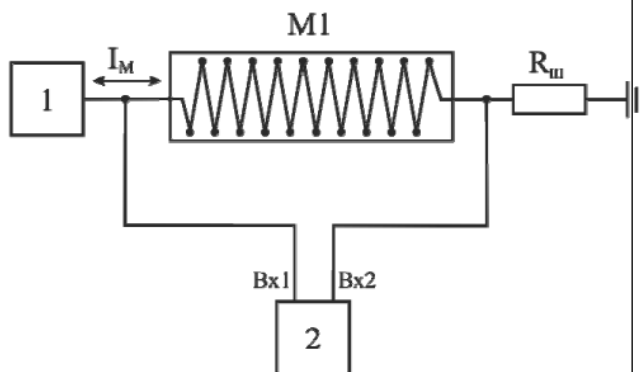


Рис.1

В состав измерительной установки входит источник токовых импульсов 1, с помощью которого через термоэлектрический модуль М1 пропускаются токовые импульсы с амплитудой 24мА. Период токовых импульсов составляет $\tau_i=0,04$ с, а их длительность – 0,02с. Величина импульсного тока контролируется двухканальным регистрирующим устройством 2 путем измерения падения напряжения на сопротивлении шунта $R_{ш}$.

Первый измерительный канал регистрирующего устройства используется для измерения напряжения на термоэлектрическом модуле, в то время как второй канал осуществляет измерение напряжения на шунте $R_{ш}$. Устройство регистрации собрано на основе коммутационного преобразователя, принцип работы которого описан в [5].

Процесс работы регистрирующего устройства носит периодический характер. Измерения по входу 1 и 2 разделены во времени на 0,04с. Также имеется возможность проведения периодической калибровки, путем подачи на вход регистрирующего устройства образцового напряжения.

Алгоритм измерений

Определение параметров термоэлектрического модуля предлагается произвести в ходе анализа переходного процесса, который возникает при смене полярности токовых импульсов. В течение времени $\frac{T}{2}$ через модуль пропускаются импульсы тока положительной полярности. При этом производится N измерений каналом 1 и 2. В течение следующего интервала времени $\frac{T}{2}$ полярность токовых импульсов изменяется на противоположную. При этом производится еще N измерений. Смена полярности импульсов внешнего тока происходит периодически с периодом равным T.

Протекание импульсного тока сопровождается выделением в спаих термодар модуля теплоты Пельтье, что приводит к изменению температур спаев и появлению термо-ЭДС. Смена полярности импульсного тока обеспечивает инвертирование теплового режима связанного с выделением теплоты

Пельтье: спаи, в которых происходило выделение теплоты Пельтье, начнут охлаждаться, в то время как спаи, что охлаждались будут нагреваться. Таким образом, с помощью теплоты Пельтье формируется тестовое воздействие на термоэлектрический модуль.

Поскольку смена полярности токовых импульсов сопровождается только их инвертированием, то можно утверждать, что количество теплоты Джоуля в течение всего периода T остается постоянным и таким образом не влияет на результаты измерения.

На рис. 2 представлена диаграмма, иллюстрирующая описанный алгоритм измерения. Цифрами отмечены моменты времени работы измерительных каналов 1 и 2.

Как видно из рис.2 имеет место поочередная работа измерительных каналов. С помощью канала 1 производится два последовательных измерения:

первое измерение происходит, когда через модуль протекает электрический ток (обозначим измеренное на этом этапе напряжение $U_1(t)$), в то время как второе – производится в его отсутствии (обозначим это напряжение $U_2(t)$). Работа второго измерительного канала аналогична: во время токового импульса измеряется напряжение $U_2(t)$, а в его отсутствии – $U_1(t)$.

Напряжение $U_1(t)$ представляет собой сумму падений напряжения на сопротивлении шунта – $R_{ш}$, на внутреннем сопротивлении модуля – r_{th} и развиваемой модулем термо-ЭДС – $\varepsilon_{TEC}(t)$:

$$U_1(t) = \varepsilon_{TEC}(t) + IR_{ш} + Ir_{th}, \quad (1)$$

где I – амплитудное значение токовых импульсов.

Измерение напряжения $U_2(t)$ производится между токовыми импульсами, соответственно при условии большого входного сопротивления устройства регистрации, можно считать, что

$$U_2(t) = \varepsilon_{TEC}(t) \quad (2)$$

Напряжение $U_2(t)$ представляет собой падение напряжения на сопротивлении шунта:

$$U_2(t) = IR_{ш} \quad (3)$$

Напряжение $U_1(t)$ измеряется на шунте в отсутствие тока и представляет собой нулевой сигнал, который используется для контроля температурного дрейфа.

В результате вычитания из выражения (1) выражения (2) и деления полученного результата на (3) получаем:

$$\frac{U_1(t) - U_2(t)}{U_2(t)} = 1 + \frac{r_{th}}{R_{ш}}$$

Откуда сопротивление модуля равно:

$$r_{th} = R_{ш} \left[\frac{U_1(t) - U_2(t)}{U_2(t)} - 1 \right] \quad (4)$$

В основу определения добротности модуля положен подход предложенный Харманом, согласно которого добротность определяется отношением развиваемой модулем термо-ЭДС – ε_{TEC} и падения напряжения на активном сопротивлении модуля, вызванным протеканием тока i :

$$z = T = \frac{i \cdot r_{th} + \varepsilon_{TEC}}{i \cdot r_{th}} - 1$$

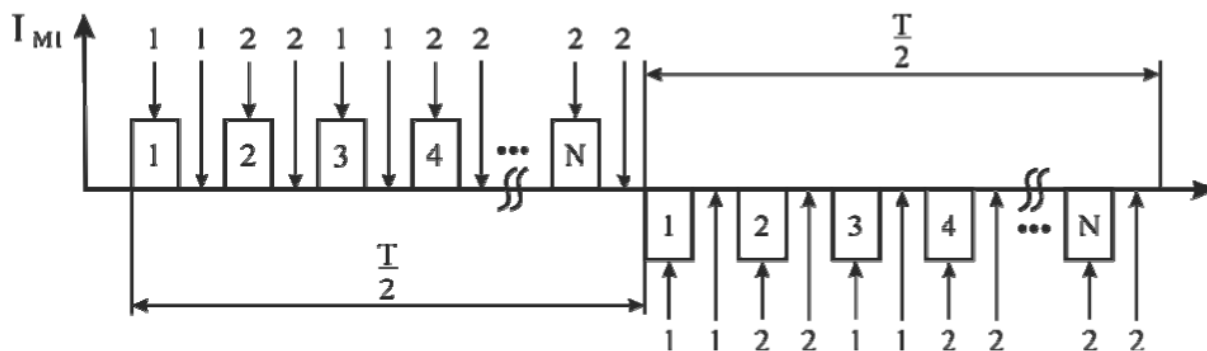


Рис. 2

При определении добротности z методом Хармана электрический ток, пропускаемый через модуль, предполагается постоянным, поэтому в случае протекания через модуль импульсного тока следует учесть его скважность k :

$$z = \frac{\varepsilon_{TEC}(t)}{k[U_1(t) - U_2(t) - U_2(t)]} \quad (5)$$

Значение временной константы τ можно определить в ходе аппроксимации временной зависимости $U_2(t)$ функцией вида:

$$f(t) = A_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

где A_0 – установившееся значение, которое определяется экспериментально. Значение τ связано с β известным соотношением:

$$\tau = \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

Оценка предлагаемого тестового метода контроля параметров термоэлектрических модулей произведена экспериментально с использованием термоэлектрического модуля TEC1-12708. На рис. 3 представлены сигналы $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_1(t) - U_2(t)$. Полученные результаты соответствуют амплитуде внешнего тока составляла 25мА и периоду смены их полярности – $T=81,84с$.

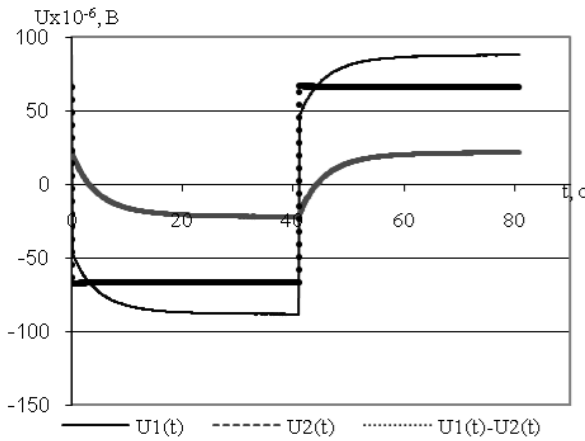


Рис. 3

В результате вычитания сигналов $U_1(t) - U_2(t)$ получаем сигнал, который остается неизменным в течение периода смены полярности внешних токовых импульсов, что позволяет рассматривать его как падение напряжения на сопротивлении модуля и шунте. В таблице 1 приведены результаты измерения установившихся значений $U_{изм}(t)$, $U_{шунт}(t)$, а также рассчитанные с их использованием значения параметров термоэлектрического модуля TEC1-112708.

Таблица 1. Результаты измерений параметров термоэлектрического модуля TEC1-112708.

$U_{изм}(t) \cdot 10^{-2}$, В	$U_{шунт}(t) \cdot 10^{-2}$, В	$r_{ш}$, Ом	$z \cdot T$
88,07	21,77	1,48	1,76

Используемые в расчетах значения $U_{изм}$, $U_{шунт}$, $U_{шунт} - U_{изм}$, $U_{изм} - U_{шунт} - U_{шунт}$ определены в результате усреднения экспериментальных значений. Причем имеется возможность провести такое усреднения как среди значений одного периода смены полярности токовых импульсов, так и по нескольким таким периодам.

Заключение

Контроль качества термоэлектрических устройств основан на измерении добротности Z , электрического сопротивления r модуля и временной константы τ . Использование для решения этой задачи контроля метода Хармана или его модификаций предоставляет ряд весомых преимуществ, основными из которых являются высокое быстродействие и относительная простота реализации. В то же время существуют и определенные сложности, связанные с выбором величины измерительного тока, выделением в измеряемом напряжении составляющей связанной с термо-ЭДС. Использование в составе измерительных установок коммутационных преобразователей позволяет уменьшить значения рабочих токов и тем самым также уменьшить взаимодействие модуля с окружающей средой в процессе измерения.

Пропускание импульсного внешнего тока через термоэлектрическое устройство обеспечивает формирование с использованием теплоты Пельтье входного тестового воздействия, а периодическое изменение полярности импульсов позволяет получить чередующиеся последовательности сигналов, соответствующих инвертированию режима работы устройства. Дальнейший анализ этих сигналов позволяет определить значение термо-ЭДС генерируемое модулем, сопротивление модуля, добротность и временную константу. Повысить точность производимых измерений, без существенного снижения быстродействия представляется возможным за счет усреднения, как отдельных экземпляров сигналов, так и значений принадлежащих одному сигналу. Таким образом, предлагаемый метод тестового контроля качества термоэлектрических модулей обеспечивает определение всего спектра необходимых характеристик с погрешностью на уровне 2,5%.

Применение тестового метода измерения параметров термоэлектрических модулей и совершенствование технологий альтернативной энергетики обеспечит повышение эффективности термоэлектрического преобразования энергии, что делает оправданным их применение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на протяжении их жизненного цикла.

Литература

1. А.Ф. Иоффе Полупроводниковые термоэлементы / А.Ф. Иоффе ; АН СССР, Ин-т полупроводников. — М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. — 188 с.
2. Harman T.C. Special techniques for measurement of thermoelectric properties. J.Appl. Phys., 29, 1959, 1373
3. В. Володин, Г. Громов Расширенные методы Z-метрии. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rmtltd.ru>
4. А.Б. Путилин, Е.А. Юрагов Анализ возможностей и реализация современных методов измерения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.library.ugatu.ac.ru/pdf/magazines/izmt03_no12
5. А.С. Жагров, В.Ю. Луценко, Ю.С.Оселедчик Экспериментальное исследование датчика температуры с коммутационным преобразованием тер-мо-ЭДС.- Украинський метрологічний журнал. — Харків: ДНВО "Метрологія". — 2008. — №4. — С.29-37.

References

1. A.F. Ioffe Poluprovodnikovyje termoelementy / A.F. Ioffe ; AN SSSR, In-t poluprovodnikov. — M.; L. : Izd-vo AN SSSR, 1960. — 188.
2. Harman T.C. Special techniques for measurement of thermoelectric properties. J.Appl. Phys., 29, 1959, 1373

3. V. Volodin, G. Gromov *Rasshirennyye metody Z-metrii. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <http://www.rmtltd.ru>*
 4. A.B. Putilin, E.A. Yuragov *Analiz vozmozhnostej i realizaciya sovremennyh metodov izmereniya. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: www.library.ugatu.ac.ru/pdf/magazins/izmt03_no12*
 5. A.S. Zhagrov, V.Yu. Lucenko, Yu.S. Oseledchik *Eksperimentalnoe issledovanie datchika temperatury s kommutacionnym preobrazovaniem termo-EDS.- Ukrayinskij metrologichnij zhurnal. – Harkiv: DNVO "Metrologiya". – 2008. – №4. – P.29-37.*

П.Є. Григоровський, д.т.н., проф, с.н.с., ORCID 0000-0003-0527-5890 зав. кафедри автоматизації технологічних процесів КНУБА; **В.Ю. Луценко** к.т.н.; доцент; **О.В. Бондарчук** к.т.н., доцент; **Л.Г. Соболевська** асистент; **М.В. Волчков** асистент; **А.О. Вольгерс** асистент; **М.І. Самойленко** асистент
 Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМО-ЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ МЕТОДАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Анотація. Розвиток альтернативної енергетики і застосування її досягнень при проектуванні та впровадженні в складі цивільних об'єктів на етапі їх будівництва і експлуатації, вимагає комплексного підходу до визначення характеристик якості перетворювачів одного виду енергії в інший. В даний час активно розвивається напрямок, пов'язаний з використанням елементів Пельтьє в складі теплових насосів, що входять в систему кондиціонування будівель. Високою ефективністю відрізняється термоелектричний обігрів приміщень, оскільки крім виділення Джоулева тепла має місце додаткове виділення теплоти Пельтьє. Один із перспективних напрямів цієї галузі пов'язано із застосуванням термоелектричних пристроїв, найвідомішими з яких є термоелектрогенератори і холодильні елементи Пельтьє. Отримання нових термоелектричних матеріалів і вдосконалення технологій забезпечили підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії, що зробило виправданим їх застосування при будівництві та експлуатації будівель і споруд під час їх життєвого циклу. Для підвищення ефективності термоелектричних перетворювачів запропоновано новий спосіб і експериментальна установка визначення комплексу характеристик термоелектричних модулів з використанням тестової дії, яка формується з використанням теплоти Пельтьє. Значення опору модуля, термоелектричної добротності і постійної часу визначається в ході аналізу перехідного процесу, який виникає в результаті періодичної зміни полярності, пропускаються через модуль імпульсів струму. Розроблений алгоритм забезпечує зменшення результуючої похибки за рахунок зменшення впливу на результати вимірювання тепла Джоуля і усереднення результатів.

Ключові слова: альтернативна енергетика, термоелектрика, термоелектричні параметри, ме-тод Харман, перехідний процес, вимірювання, похибки.

P.E. Hryhorovskiy, ORCID: 0000-0003-0527-5890, Doctor of Technical Sciences; **V. Yu. Lutsenko** associate professor; **O.V. Bondarchuk** associate professor; **L.G. Sobolevska** assistant; **M.V. Volchikov** assistant; **A.O. Volters** assistant; **M.I. Samoilenko** assistant
 Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF INCREASE OF EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC ENERGY TRANSFER BY METHODS OF ALTERNATIVE ENERGY

Abstract. The development of alternative energy and the application of its achievements in the design and implementation of civilian objects at the stage of their construction and operation requires a comprehensive approach to determine the quality characteristics of converters of one type of energy to another. Currently, the direction associated with the use of Peltier elements in the composition of heat pumps included in the air conditioning system of buildings is actively developing. The thermoelectric heating of the premises differs in high efficiency, because in addition to the Joule heat, there is an additional Peltier heat release. One of the promising areas of this industry is related to the use of thermoelectric devices, the most famous of which are thermoelectric generators and Peltier refrigeration units. The acquisition of new thermoelectric materials and the improvement of technologies have ensured an increase in the efficiency of thermoelectric energy conversion, which has justified their use in the construction and operation of buildings and structures during their life cycle. To increase the efficiency of thermoelectric converters, a new method and experimental setup of determining the complex of characteristics of thermoelectric modules using a test action formed using Peltier heat is proposed. The values of the modulus resistance, thermoelectric figure of merit and time constant are determined during the transient analysis, which results from the periodic change of polarity, passed through the current pulse module. The algorithm developed reduces the resulting error by reducing the effect on the Joule heat measurement results and averaging the results.

Key words: alternative energy, thermoelectricity, thermoelectric parameters, Harman's method, transient, measurements, errors.